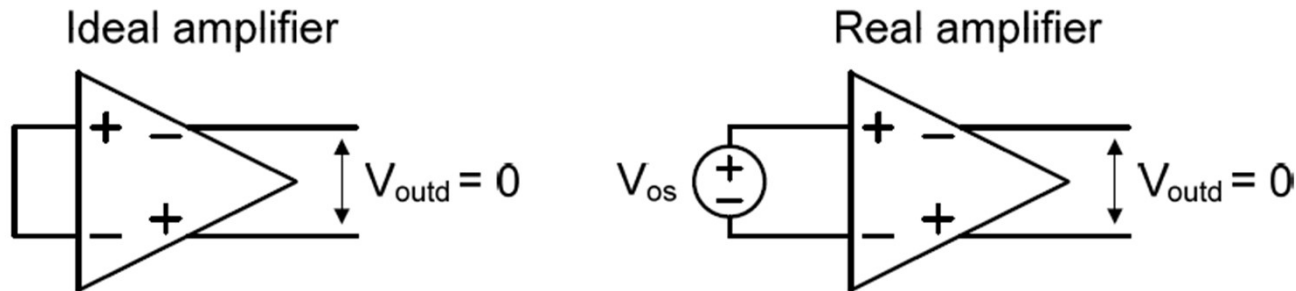
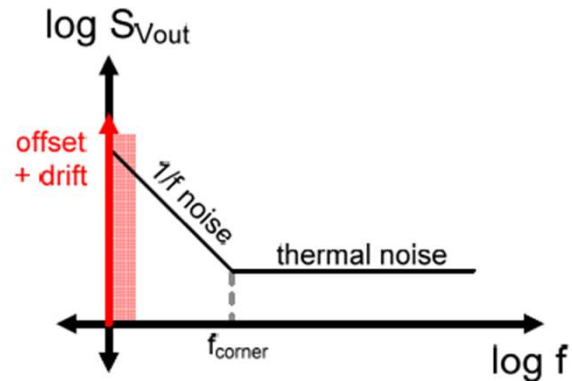


# Kompenzacija ofseta i Flicker šuma u CMOS pojačavačima

- Offset postoji u svim analognim CMOS kolima
- Naponski Offset u CMOS kolima je veći nego u CMOS i BICMOS kolima i tipično je reda 1-10mV



- Redukcija offseta se sprovodi pomoću:
  1. Korišćenja komponenti sa velikim dimenzijama i dobrim layoutom
  2. Trimovanja
  3. Tehnika za dinamičko poništavanje offseta (Dynamic offset-cancellation (DOC))
- Korišćenjem komponenti sa uvećanim dimenzijama može se smanjiti flicker šum, ali neefikasno ispod 100uV i sa  $f_{corner} < 1\text{kHz}$
- Neidealnosti OTA na niskim učestanostima su naponski ofset, koji je posledica reazdešenosti parametara komponenata i procesa, vremenski promenljivog ofseta, koji je najčešće posledica temperaturnih varijacija i 1/f šum
- Postfabrikacijsko trimovanje može redukovati offset na vrednost manju od 1uV, ali je uticaj temperaturnog drifta veliki, reda 100uV



F. Witte, K.A.A. Makinwa, J. Huijsing, Dynamic Offset Compensated CMOS Amplifiers, Springer, 2009.

- Digitalna kalibracija je dobra za statičko poništavanje ofseta i često se koristi, ali je za dinamičko poništavanje ofseta kompleksna i neefikasna

- DOC tehnike

Prednosti:

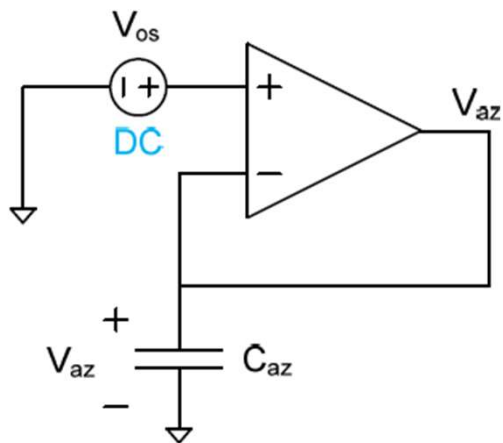
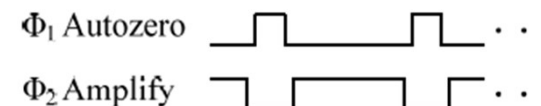
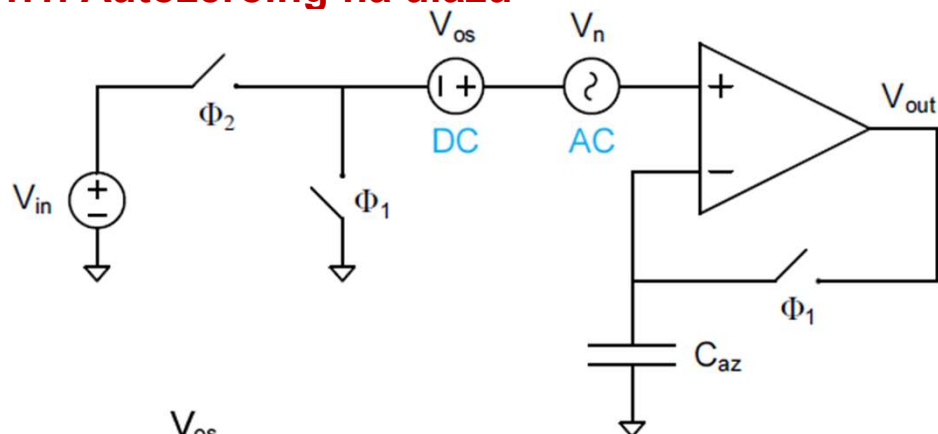
- smanjenje offseta i  $1/f$  šuma
- postojana dugoročna stabilnost realizacije
- ne zahteva dodatne troškove pri testiranju

Mane:

- redukuje propusni opseg
- značajno povećava kompleksnost
- aliasing i intermodulaciona izobličenja
- Ove tehnike mogu da smanje naponski ofset ispod 1 $\mu$ V i graničnu učestanost  $f_{\text{corner}} < 10\text{mHz}$

- Pored smanjivanja naponskog ofseta i flicker šuma ove tehnike mogu poboljšati CMRR i PSRR
- DOC tehnike se dele na:
  1. Autozeroing tehnike (SC kola)
  2. Chopping tehnike
  3. Dynamic element matching (DEM)

### 1.1. Autozeroing na ulazu

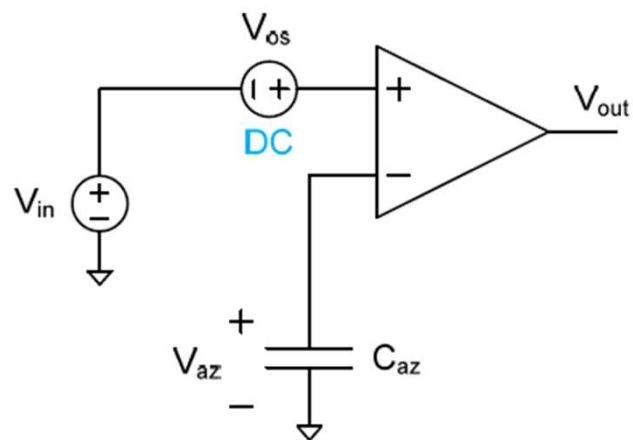


DC analiza:  $V_n=0$

Φ1:

$$V_{az} = A_0 (V_{OS} - V_{az}) \Rightarrow V_{az} = \frac{A_0}{1 + A_0} V_{OS}$$

- Pojačavač se ne može koristiti za pojačanje u ovoj fazi



Φ2:

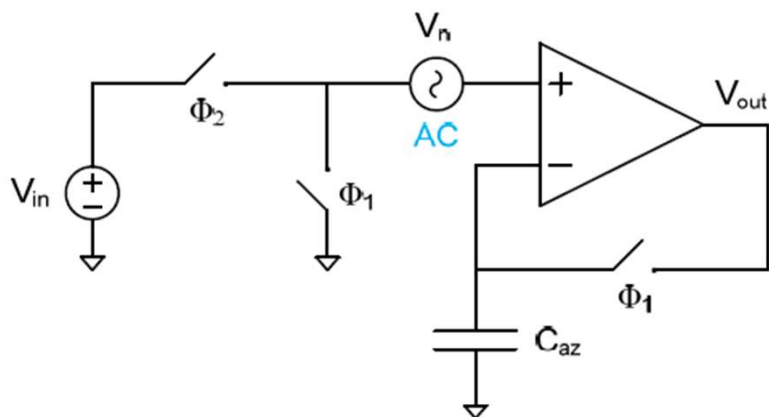
$$V_{out} = A_0 (V_{in} + V_{OS} - V_{az})$$

$$\Rightarrow V_{out} = A_0 \left( V_{in} + V_{OS} - \frac{A_0}{1 + A_0} V_{OS} \right)$$

$$\Rightarrow V_{out} = A_0 \left( V_{in} + \frac{V_{OS}}{1 + A_0} \right)$$

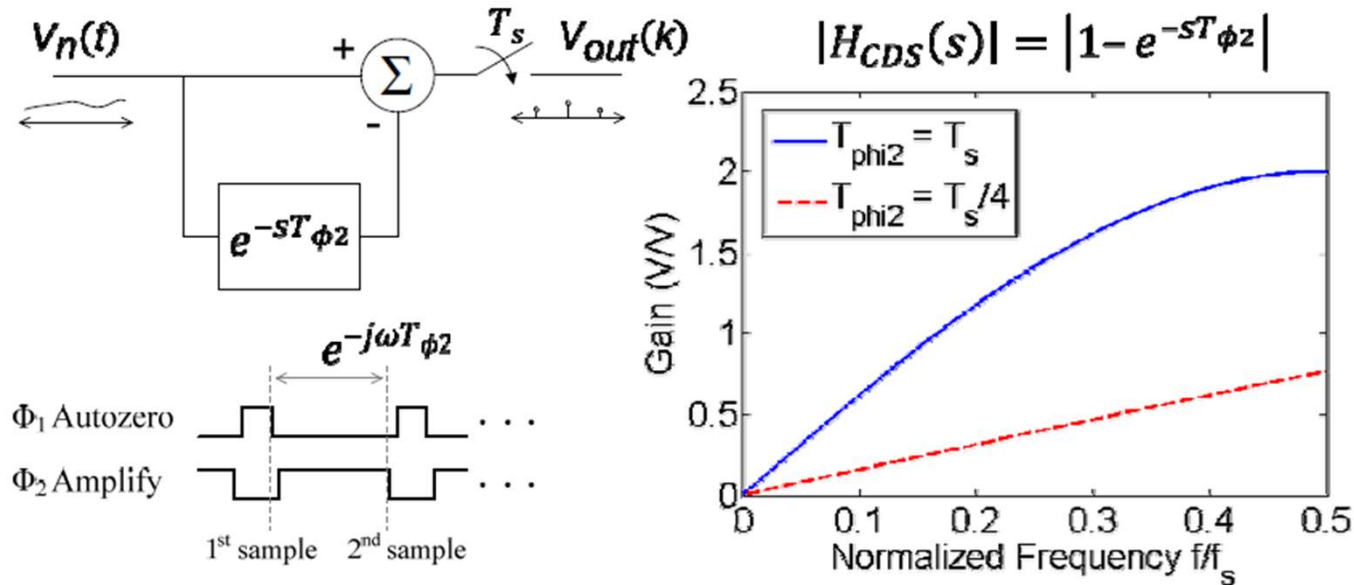
- Ulazni signal se pojačava, a izlazni signal u ovoj fazi je proporcionalan ulaznom signalu
- Naponski ofset pojačavača je potisnut, ali nepotpuno zbog konačnog pojačanja pojačavača

AC analiza:  $V_{OS}=0$

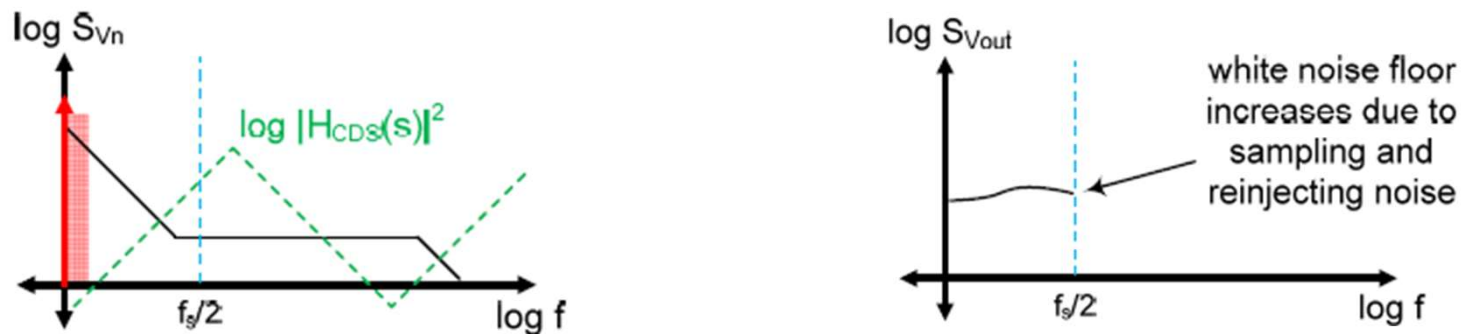


- Šum pojačavača i drift se uzorkuju i pamte u kondenzatoru  $C_{az}$
- Rezidualni šum na izlazu u toku faze Φ2 jednak je razlici trenutnog šuma i semplovanog šuma, zapamćenog na kondenzatoru
- NF šum se ne menja rapidno, pa je njegovo potiskivanje dobro

- HF šum se translira na niske učestanosti (noise folding)
- Na izlazu je to ekvivalentno kao korelisano dvostruko uzorkovanje (Correlated Double Sampling-CDS)



- Šum se filtrira sa  $H_{CDS}(s)$  i translira u opseg učestanosti od 0 do  $f_s/2$

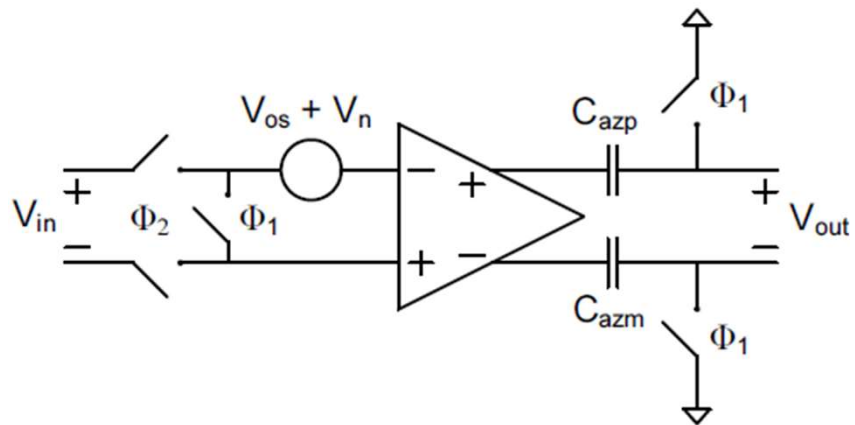


- Za dobro potiskivanje  $1/f$  šuma treba da je  $f_s \gg f_{corner}$

## Uticaj neidealnosti kola za kompenzaciju:

- Konačno pojačanje pojačavača degradira potiskivanje ofseta
- Konačni propusni opseg pojačavača degradira AC potiskivanje signala
- Charge injection (prebacivanje naelektrisanja preko parazitnih kapacitivnosti neaktivnog prekidača) stvara rezidualni DC offset. On se može smanjiti korišćenjem velikog  $C_{az}$ , prekidača sa manjim dimenzijama tranzistora, dummy prekidačima i fully differential realizacijom

### 1.2. Autozeroing na izlazu



$\Phi 1$ :

$$V_{outdiff} = A_0 V_{OS}$$

$$V_{azp} = V_{outdiff} / 2 = A_0 V_{OS} / 2$$

$$V_{azm} = -V_{outdiff} / 2 = -A_0 V_{OS} / 2$$

$\Phi 2$ :

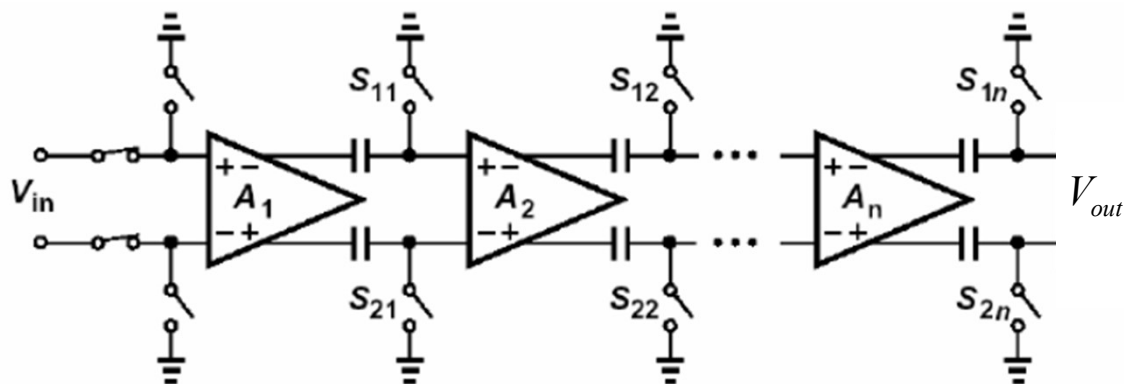
$$V_{outdiff} = A_0 (V_{in} - V_{OS})$$

$$\Rightarrow V_{out} = V_{outdiff} - (V_{azp} - V_{azm}) = A_0 (V_{in} - V_{OS}) - A_0 V_{OS} = A_0 V_{in}$$

- Konačno pojačanje pojačavača ne utiče na kompenzaciju naponskog offseta
- Charge injection na ulazu manje utiče nego kod prethodnog kola

- Zbog diferencijalnog izlaza charge injection na izlazu ima vrlo mali uticaj
- Nedostatak ovog pojačavača je smanjenje opsega korisnog signala jer je na izlazu u toku faze pojačavanja signala prisutan i pojačani ulazni naponski offset. Ovo ograničenje amplitude korisnog signala može biti veliko kada je pojačanje pojačavača veliko.

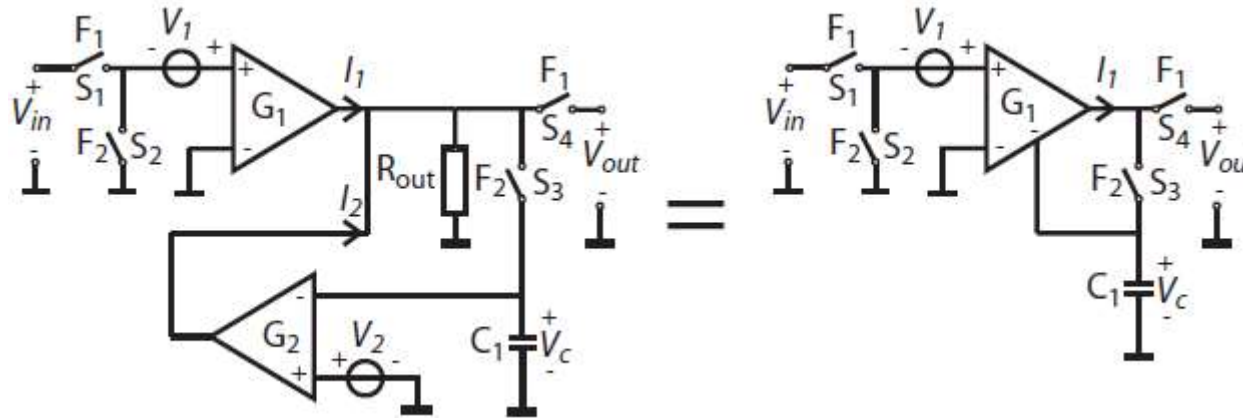
### 1.2.1. Kompenzacija ofseta u višestepenim pojačavačima



F. Witte, K.A.A. Makinwa, J. Huijsing, Dynamic Offset Compensated CMOS Amplifiers, Springer, 2009.



## 1.2.1. Kompenzacija ofseta pomoću dodatnog pojačavača



- Tehnika automatske kompenzacije ofseta koja je manje osetljiva na ubrizgavanje naelektrisanja.
- Kondenzator se ne nalazi na putu signala već se uključuje paralelno sa izlazom
- $R_{out}$  je otpornost, ili transrezistansni pojačavač
- Naponski ofseti pojačavača su  $V_1$  i  $V_2$ .
- Pomoću kondenzatora  $C_1$  i transkonduktanse  $G_2$ , generiše se kompenzaciona struja  $I_2$ .

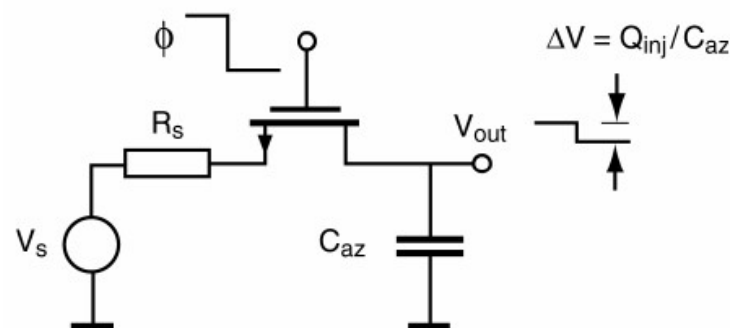
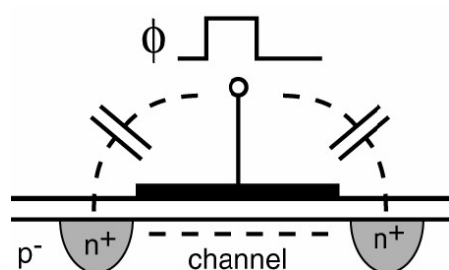
$$\Phi 2: \quad V_c = V_1 G_1 R_{out} + (V_2 - V_c) G_2 R_{out} \Rightarrow V_c = \frac{V_1 G_1 R_{out} + V_2 G_2 R_{out}}{1 + G_2 R_{out}}$$

$$\Phi 1: \quad V_{out} = (V_1 + V_{in}) G_1 R_{out} - V_c G_2 R_{out} = V_{in} G_1 R_{out} + V_1 \frac{G_1 R_{out}}{1 + G_2 R_{out}} + V_2 \frac{G_2 R_{out}}{1 + G_2 R_{out}}$$

- Ekvivalentni ofset na ulazu iznosi

$$V_{OS,res} = \frac{V_1}{1 + G_2 R_{out}} + \frac{V_2}{1 + G_2 R_{out}} \frac{G_2}{G_1}$$

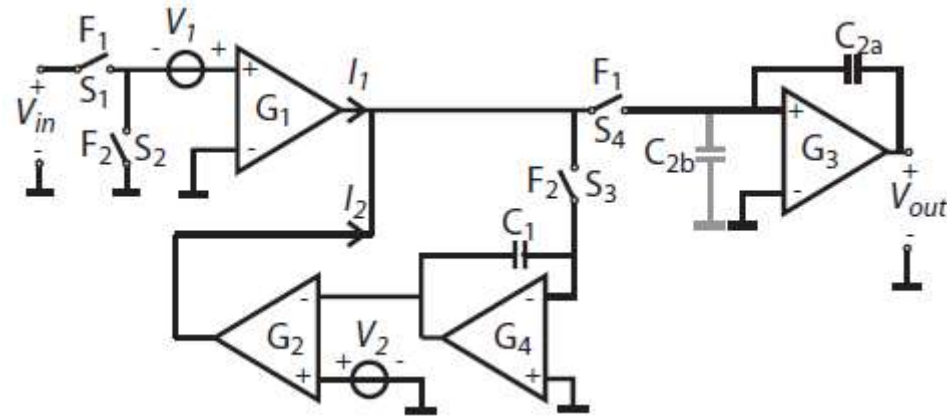
- Postoji i uticaj charge injection-a MOS prekidača S3



- Kada je MOSFETs zakočen postoje dve komponente:
  1. Channel charge,  $Q_{ch} = WLC_{ox}(V_{GS} - V_{TH})$
  2. Naelektrisanje zbog kapacitivnosti preklapanja između gejta i oblasti sorsa i drejna

$$V_{OS,res,inj} = \frac{V_1}{1 + G_2 R_{out}} + \frac{V_2}{1 + G_2 R_{out}} \frac{G_2}{G_1} + \frac{G_2}{G_1} \Delta V = \frac{V_1}{1 + G_2 R_{out}} + \frac{V_2}{1 + G_2 R_{out}} \frac{G_2}{G_1} + \frac{G_2}{G_1} \frac{q_{inj3}}{C_1}$$

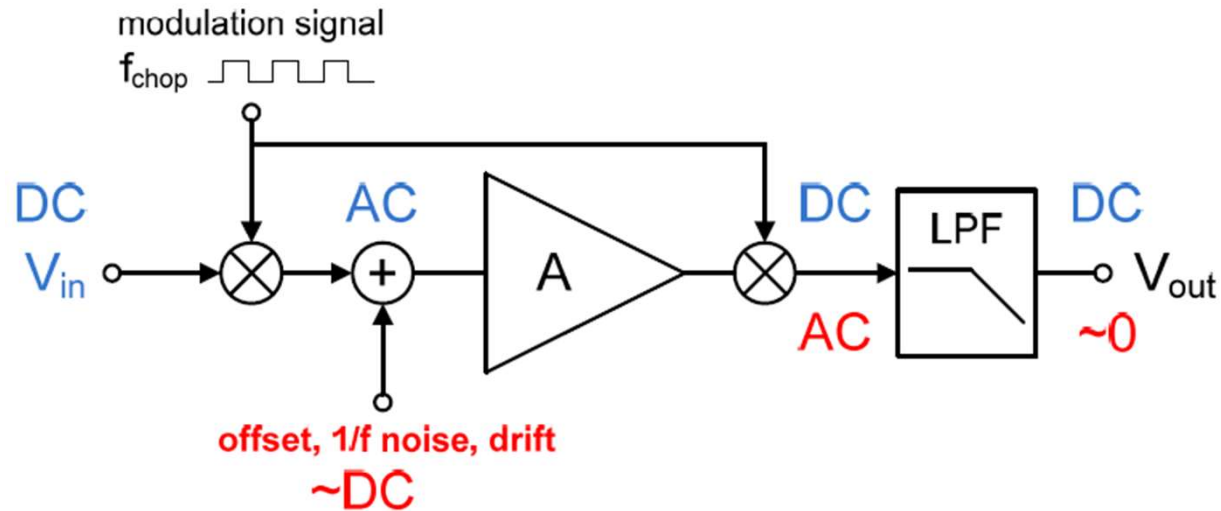
- Izlaz  $G_1$  naglo menja vrednosti između izlaznog napona i napona  $V_C$  na kompenzacionom kondenzatoru  $C_1$ , što proizvodi naponske spajkove.
- Da bi se prevazišao ovaj problem, može se koristiti druga topologija u kojoj je  $C_1$  zamenjen aktivnim integratorom.



- Pojačavač G4 koji se koristi za implementaciju aktivnog integratora ima isti ulazni napon srednje vrednosti (nula ili  $0.5V_{DD}$ ), kao izlazni stepen G3. Izlazni napon G1 je u okolini ovog zajedničkog napona i nema spajkove.
- Ekvivalentni kondenzator C2b služi kao kao prati-pamti kolo.
- Zbog uzorkovanja, automatsko postavljanje nule (autozeroing) je tehnika koja nije pogodna za kontinualne sisteme.
- Postoji charge-injection problem i dodatni problem usled struja curenja kondenzatora u pojačavačkoj fazi rada ( $\Phi_1$ )
- Ova tehnika se uglavnom koristi u SC kolima.

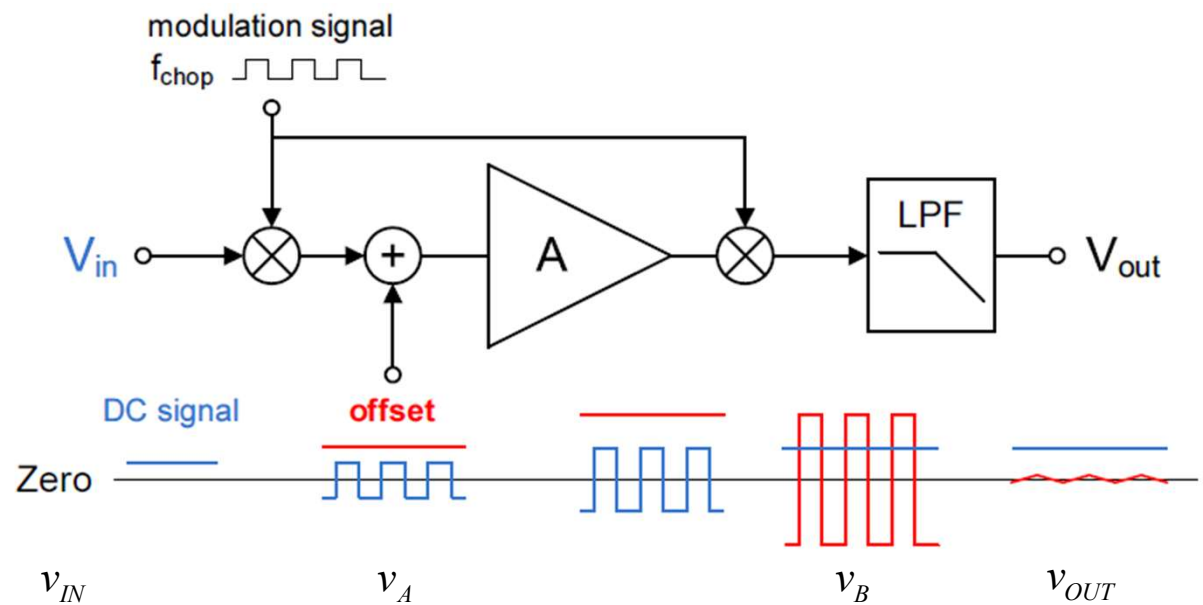
## 2. Čoperski pojačavači

- Dok su kod auto-zero pojačavača offset i ulazni signal se modulišu vremenski, u čoperskim pojačavačima ovi signali su frekventno modulirani.
- Ulazni signal i signal offseta šifrovani su u različite frekventne opsege da bi se kompenzovao offset.

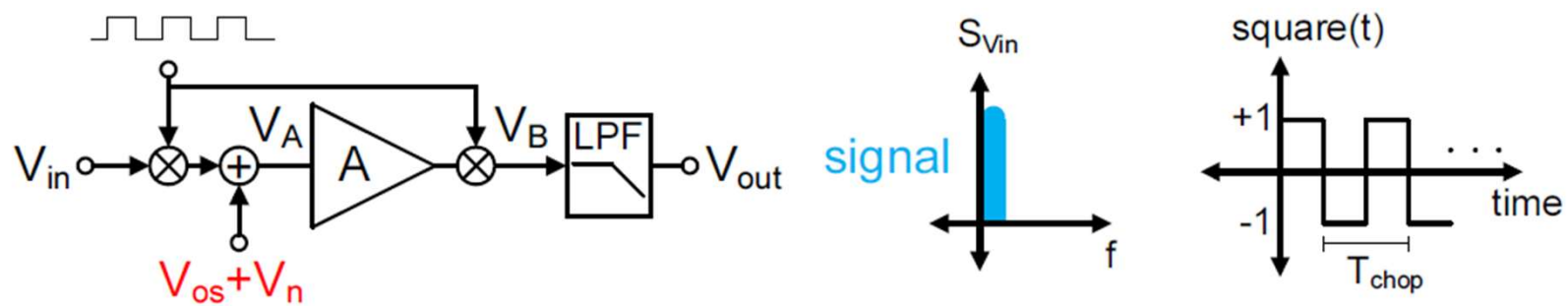


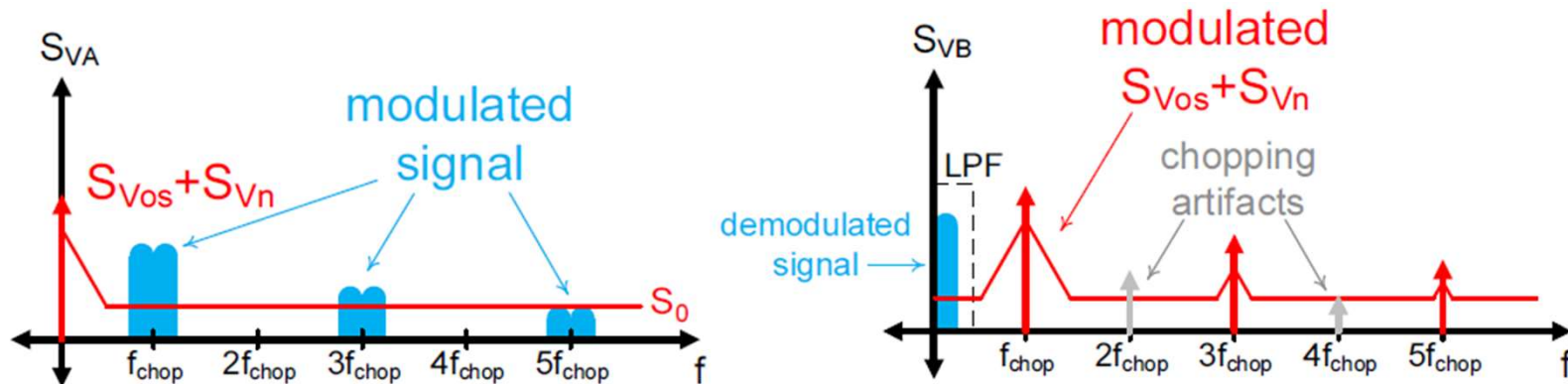
- Ulazni signal se moduliše sa ulaznim čoperom, translira na višu učestanost i potom demoduliše
- Neidealnosti pojačavača se takođe modulišu sa izlaznim čoperom na višu učestanost i potom filtriraju izlaznim filtrom

- Vremenski domen:



- Frekventni domen:



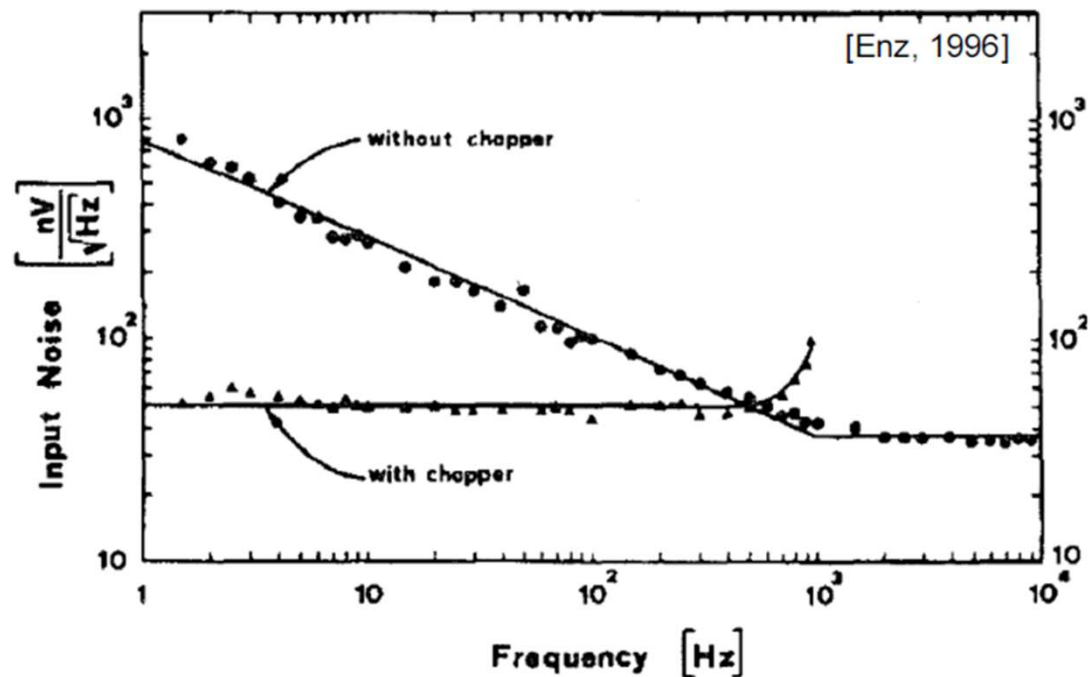


- Rezidualni NF šum se sastoji iz dve komponente:
  - ✓ Termički šum oko  $(2k+1)f_{chop}$  transliran u baseband (pojačanje konverzije  $2/\pi^2$ )
  - ✓ Flicker šum oko  $(2k+1)f_{chop}$  transliran u baseband rezultira skoro konstantnom spektralnom gustinom snage skaliranom sa  $f_{corner}/f_{chop}$
- Dobra aproksimacija baseband šuma u čoperskim pojačavačima

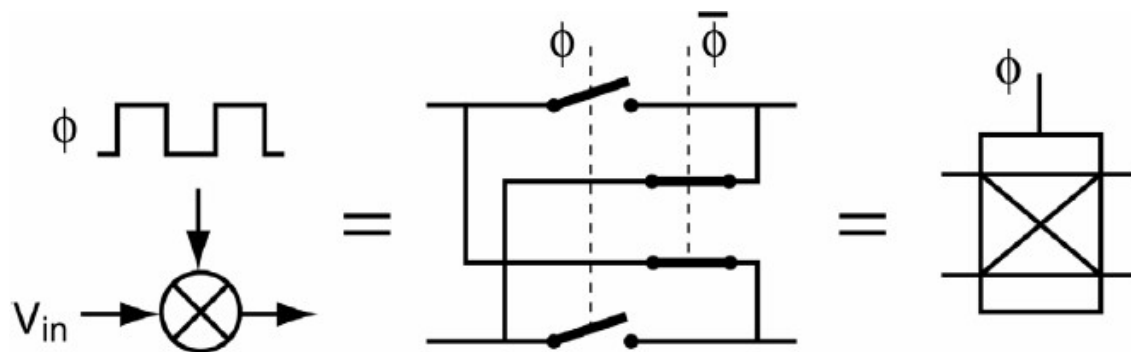
$$S_{VB} = S_0 \left( 1 + 0.85 \frac{f_{corner}}{f_{chop}} \right)$$

Primer:  $f_{chop} = f_{corner} = 1 \text{ kHz}$

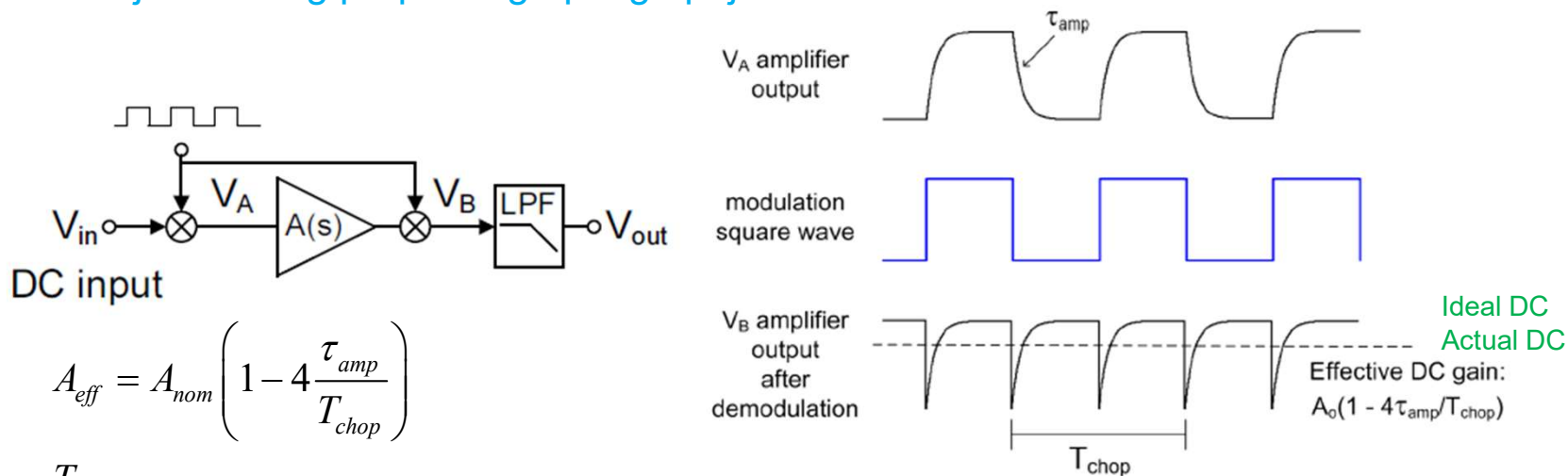
- $1/f$  šum je kompletno potisnut kada je  $f_{chop} \gg f_{corner}$
  - State-of-the-art:  $8.5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
- C. Menolfi, Q. Huang, "A fully integrated CMOS instrumentation amplifier with submicrovolt offset," IEEE JSSC, vol. 34, March 1999, p.p. 415-420.



- Kolo za generisanje moduliranih signala sa 4 naponski kontrolisana CMOS prekidača

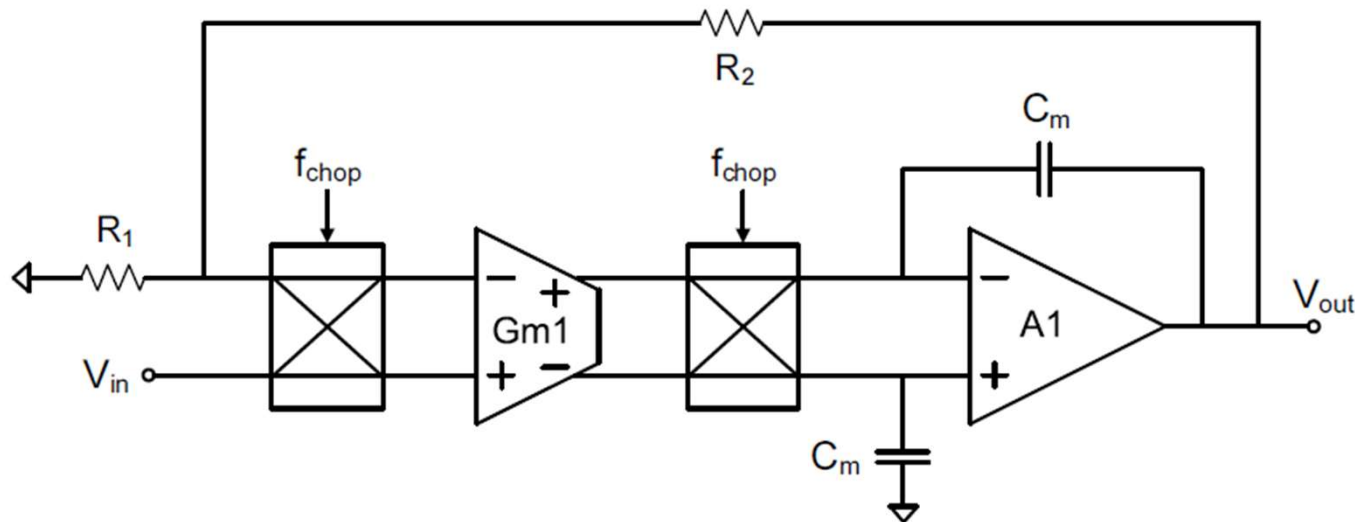


- Uticaj konačnog propusnog opsega pojačavača



- $\frac{T_{chop}}{\tau_{amp}} = 40 \Rightarrow 10\% \text{ error}$
- Konačni propusni opseg pojačavača unosi spektralne komponente i na  $2 \cdot k \cdot f_{chop}$
- Fazni razlika koju unosi pojačavač i fazna razlika ulaznog i izlaznog čopera, takođe utiču na potiskivanje šuma i offseta

## 2.1. Čoperski pojačavači sa negativnom povratnom spregom

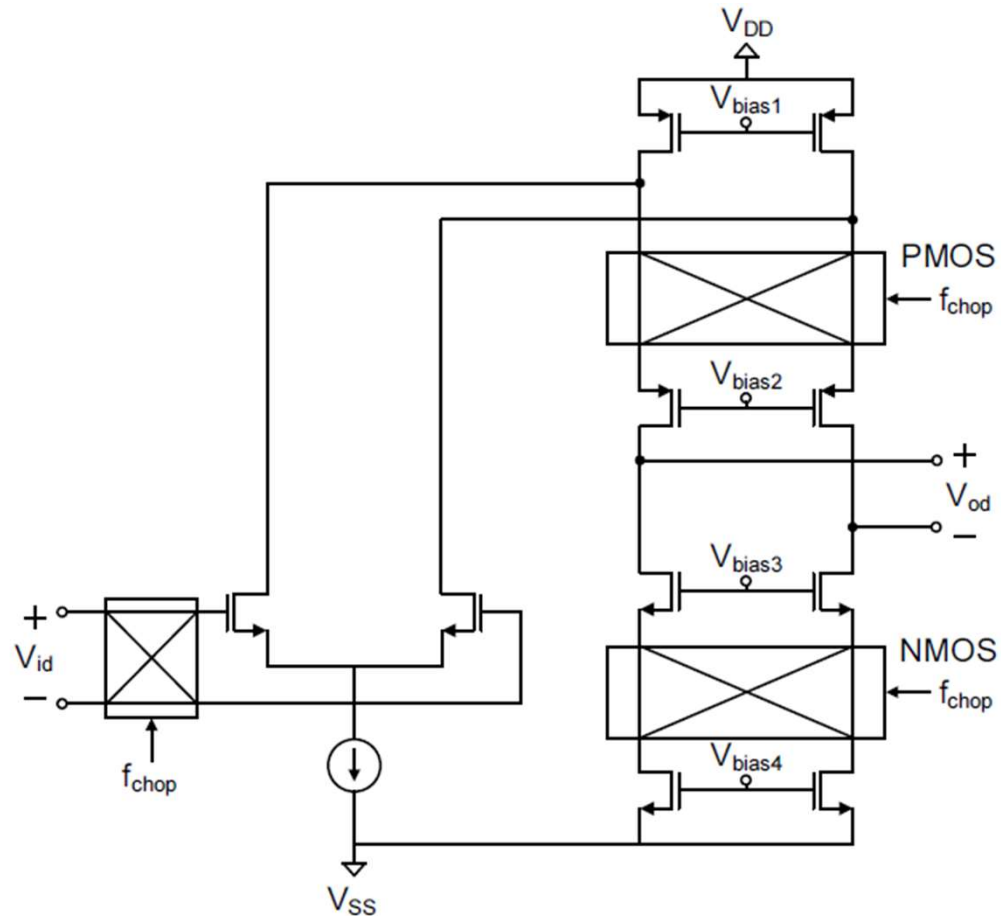


- Milerova kompenzacija u kolu pojačavača  $A_1$  je istovremeno i filter, koji smanjuje ripple signala
- Velika transkonduktansa ulaznog stepena  $G_{m1}$  je potrebna radi dobrog potiskivanja naponskog offseta pojačavača  $A_1$

$$A_0 \approx 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

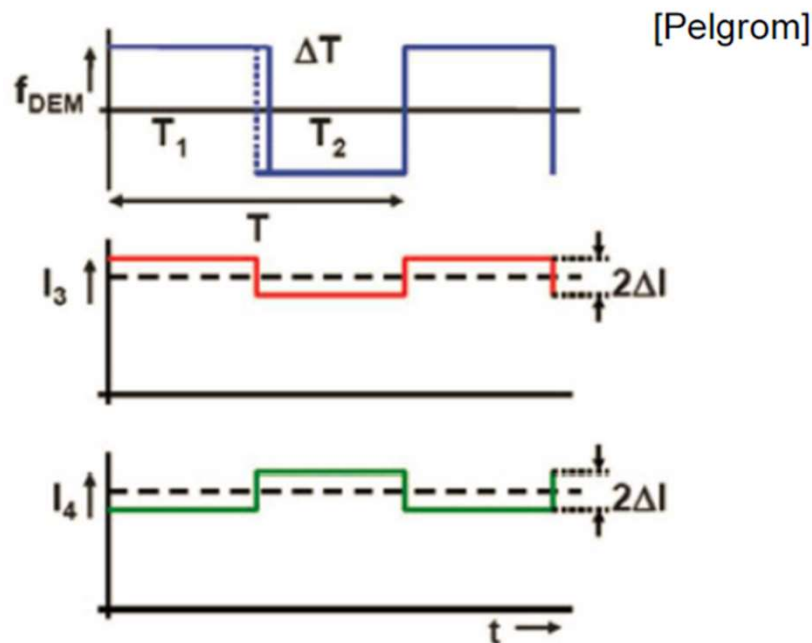
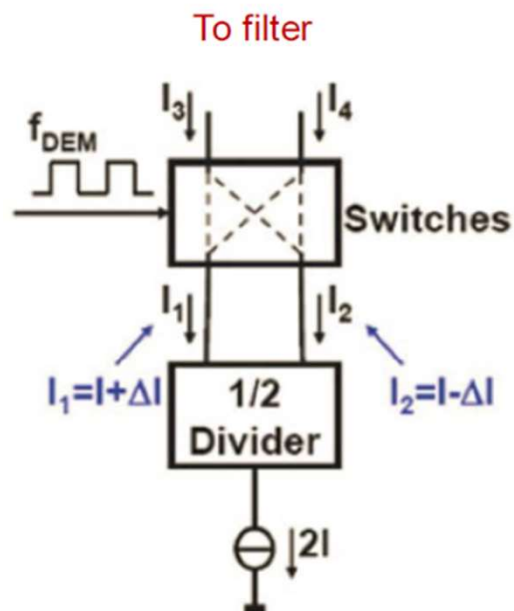


## 2.2. Čoperski Folded Cascode pojačavač



- Tri čopera, jedan ulazni i dva izlazna
- PMOS izlazni čoper je demodulator, dok je NMOS izlazni čoper obezbeđuje dinamičko uparivanje karakteristika (Dynamic Element Matching)
- Izlazni čoperi su postavljeni na mesta sa malim impedansama jer će tako imati brži odziv

### 3. Dynamic Element Matching

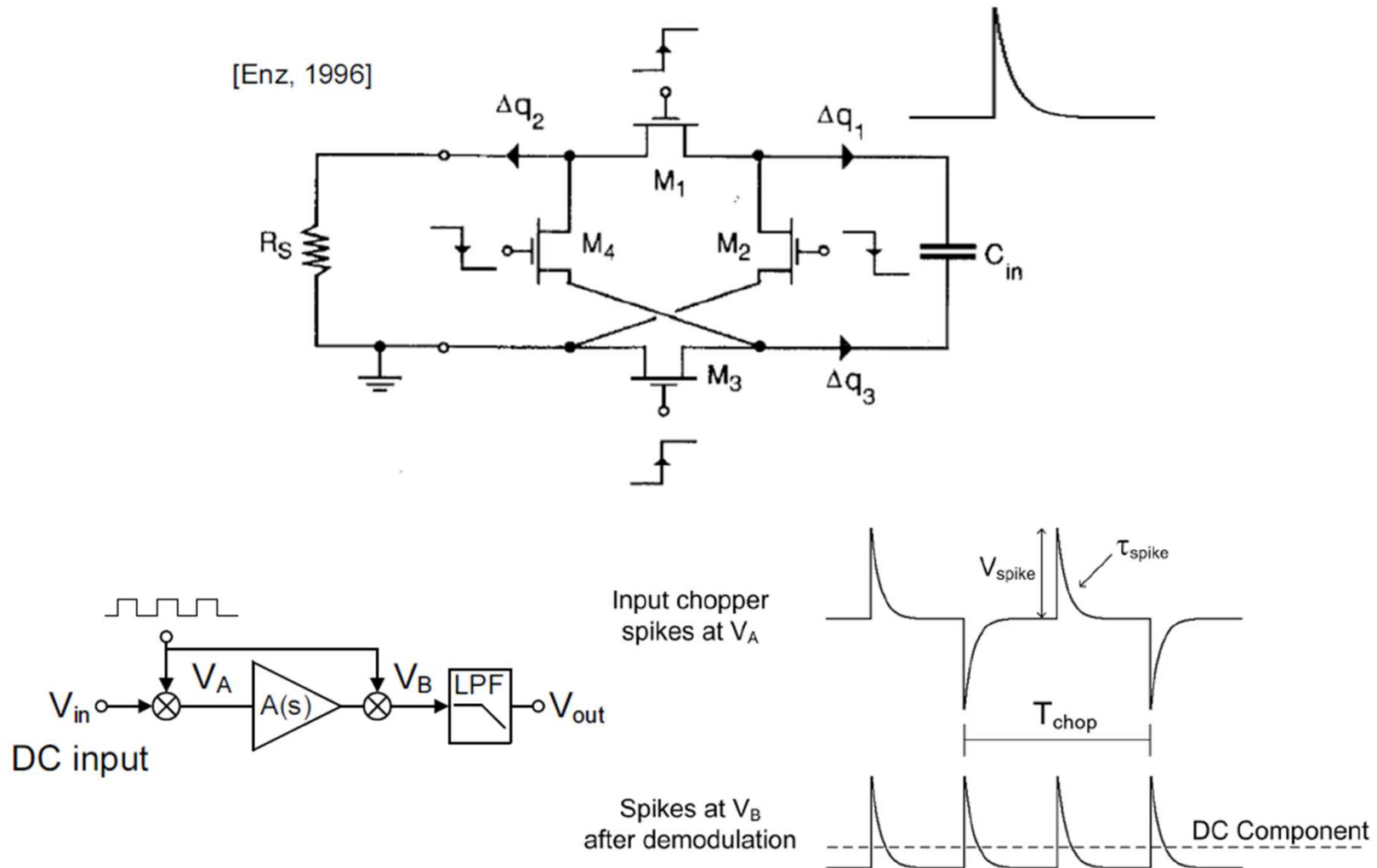


- Srednja vrednost struja  $I_3$  i  $I_4$  je ista  $I$  iznosi  $I$
- Izvorna ideja osmišljena u D/A konvertorima za proporcionalan odnos struja u pojedinim težinskim granama

R.J. Van De Plassche, "Dynamic element matching for high-accuracy monolithic D/A converters," IEEE Journal of Solid-State Circuits ( Volume: 11, Issue: 6, Dec 1976)

## 2.3. Uticaj charge injection efekta u čoperskim pojačavačima

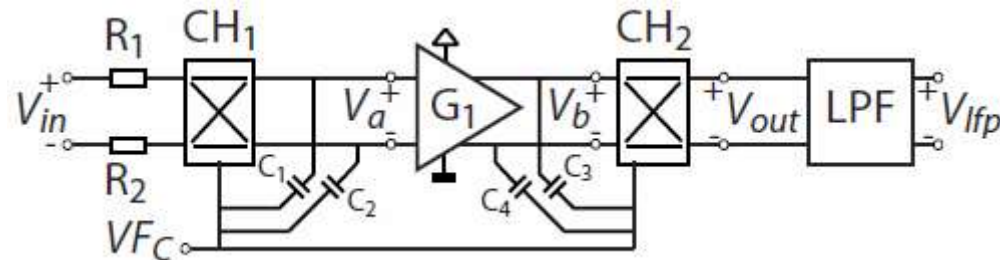
- Rezidualni ofset je uglavnom uzrokovan neusklađenošću ubrizgavanja naelektrisanja od signala takta do ulaza i izlaza čoperskog pojačavača.
- Ulazni čoper



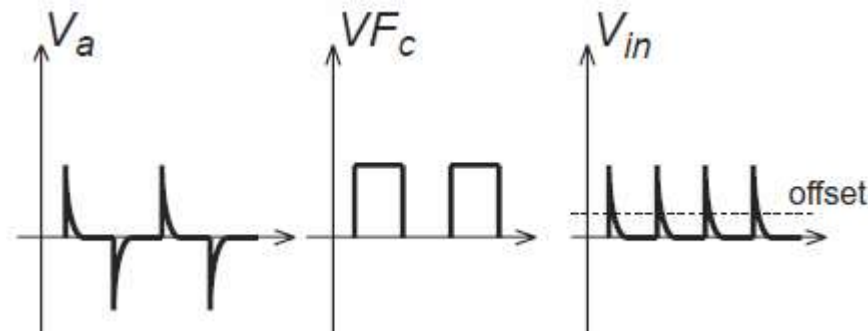
- Demodulirani signal ima spajkove, spektralne komponente i oko  $2 \cdot k \cdot f_{chop}$ , a usled toga i rezidualni offset

$$V_{OS, res} = 2 f_{chop} V_{spike} \tau_{spike}$$

- Tipične vrednosti rezidualnog offseta se kreću u opsegu od 1uV do 10uV
- Vremenska konstanta spajkova zavisi od impedanse pobude
- Spajkovi se mogu umanjiti smanjivanjem propusnog opsega pojačavača, kada je to moguće. Propusni opseg se bira kompromisno između želje za malim spajkovima i malim uticajem smanjenog propusnog opsega, odnosno greške pojačanja
- Da bi se smanjili spajkovi prekidači treba da imaju što manje parazitne kapacitivnosti, što znači da treba da budu što manjih dimenzija
- Simetrični layout i potpuno diferencijalni pojačavači mogu pretvoriti spajkove u common mode signal, koji se jednostavno potiskuje



- Prekidač je modelovan otpornostima  $R_1$ , dok je otpornost izvora  $R_2$
- Kada je  $C_1=C_2$  i  $C_3=C_4$ , kolo je simetrično i nema rezidualnog offseta
- Međutim, ako postoji mala neusklađenost između dva ulazna kondenzatora, na  $V_a$  će se takođe pojaviti diferencijalna komponenta, koja će se translirati u rezidualni offset



- Svaki put kada čoperski takt promeni stanje, on ubrizgava naelektrisanje na ulaz, koje je ekvivalentno diferencijalnom naelektrisanju

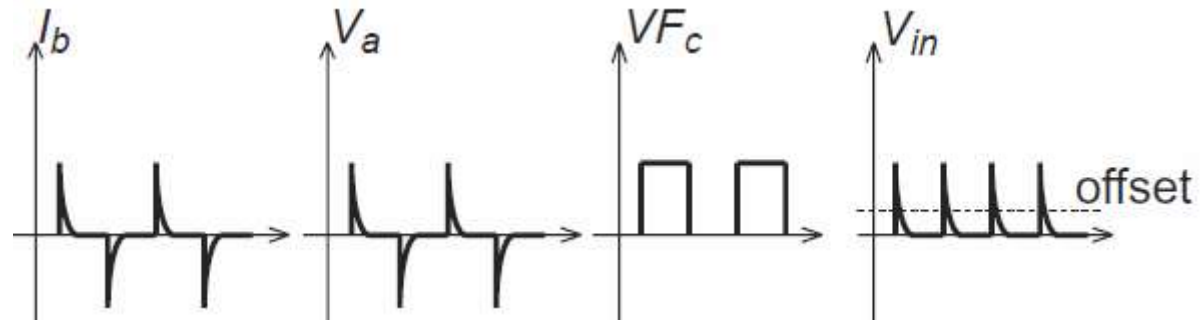
$$q_{inj} = (C_1 - C_2)V_F$$

gde je  $V_F$  naponski nivo takta

- Injektovano naelektrisanje se dva puta generiše u toku jedne periode. To znači da se usled toga pojavljuje struja kroz otpornosti  $R_1$  i  $R_2$ , pa je rezidualni offset

$$V_{OS,res1} = 2(R_1 + R_2)(C_1 - C_2)V_F f_{chop}$$

- To znači da se rezidualni offset povećava sa povećanjem frekvencije čopera. S druge strane čoperska učestanosti dovodi do povećanja  $1/f$  šuma i mora biti veća od  $f_{corner}$  učestanosti.
- Ako postoji mala neusklađenost između kondenzatora  $C_3$  i  $C_4$ , pojaviće se promena diferencijalne struje na  $V_b$ , a time će se pojaviti i promena diferencijalnog napona na  $V_a$ , što će se translirati u rezidualni offset



- Dodatni rezidualni offset je

$$V_{OS,res2} = \frac{2(C_3 - C_4)V_F f_{chop}}{G_1}$$

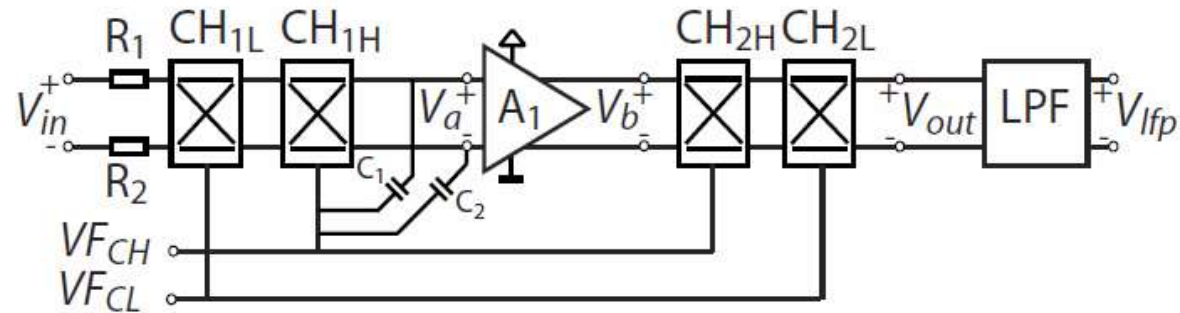
- Tako da je ukupni rezidualni offset

$$V_{OS,res} = V_{OS,res1} + V_{OS,res2}$$

## □2.4. Kola za potiskivanje uticaja charge injectiona

### 2.4.1. Ugnežđeni čoper

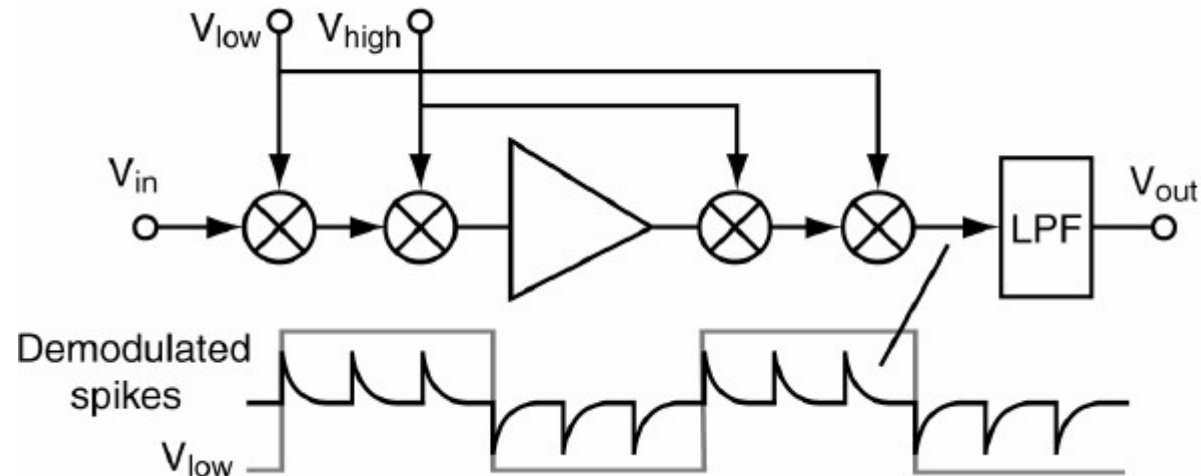
- Rezidualni offset zbog razdešenosti je proporcionalan čoperskoj frekvenciji. Sa dodatnim, ugnežđenim čoperom, rezidualni ofset se potiskuje



- Unutrašnji čoperi  $CH_{1H}$  i  $CH_{2H}$  rade na učestanosti  $F_{CH}$ . Ova učestanost je optimalno izabrana da potiskuje šum, t.j.  $F_{CH}$  treba da je dovoljno veća od  $f_{corner}$  učestanosti. Ovako izabrana učestanost će, bez dodatnog čopera, generisati relativno veliki rezidualni offset.
- Da bi se rezidualni offset umanjio, potrebno je da ugnežđeni čoperi  $CH_{1L}$  i  $CH_{2L}$ , imaju znatno nižu učestanost  $F_{CL}$ . Učestanost  $F_{CL}$  se bira prema ulaznom signalu i na taj način ugnežđeni čoper redukuje charge injection u unutrašnje čopere.
- Pomoću ove tehnike je dobijen naponski offset od 100 nV sa  $F_{CH}=2$  kHz i  $F_{CL}=15,6$  Hz (A. Bakker, K. Thiele, J.H. Huijsing, "A CMOS nested-chopper instrumentation amplifier with 100-nV offset", IEEE JSSC, pp. 1877–1883, Dec. 2000.)

- Unutrašnji čoper potiskuje 1/f šum, dok spoljašnji potiskuje rezidualni offset, odnosno charge injection

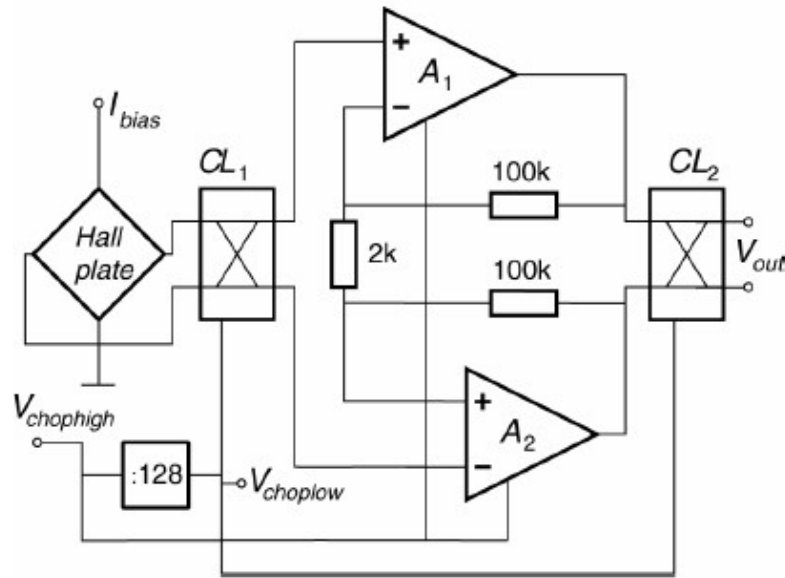
$$V_{OS,res} = 2f_{chop\_low} V_{spike} \tau_{spike}$$



- Ovakav čoperski pojačavač ima dva ripple-a.
- Prvi ripple je posledica offseta pojačavača  $A_1$  i on je modulisan učestanošću  $F_{CH}$ .
- Drugi ripple je uzrokovan rezidualnim offsetom i on se moduliše signalom učestanosti  $F_{CL}$ .
- Da bi se ovaj signal dobro filtrirao, potrebno je da LPF ima propusni opseg manji od  $F_{CL}$ .
- To čini ovu tehniku pogodnom za optimalno korišćenje u niskofrekventnim aplikacijama, kao što su senzorska kola (Hall-ov senzor, senzor za precizno merenje temperature), ali nije pogodna za pojačavače opšte namene ( general purpose amplifiers).

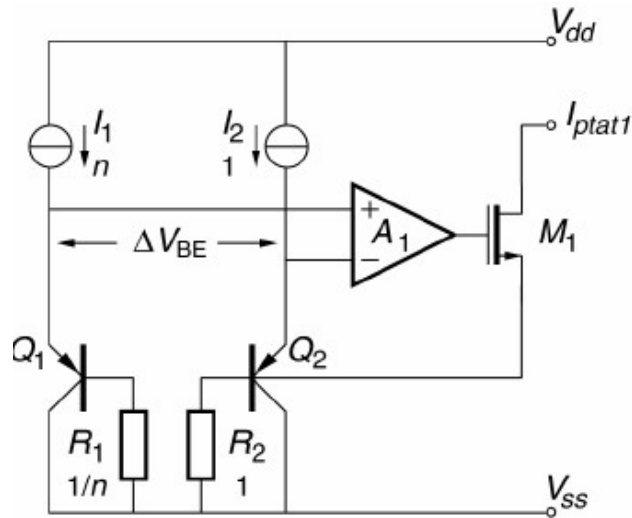


A. Bakker, J.H.Huijsing, "Low-offset, low-noise 3.5mW CMOS spinning-current Hall-effect sensor with integrated chopper amplifier," Proc. of Eurosensors XIII, Sept 1999, p.1045-1048.



•Hall-plate is read-out using spinning-current & nested chopper techniques

A. Bakker, "High-accuracy CMOS smart temperature sensors," Kluwer Academic Publishers, Boston, 2000.

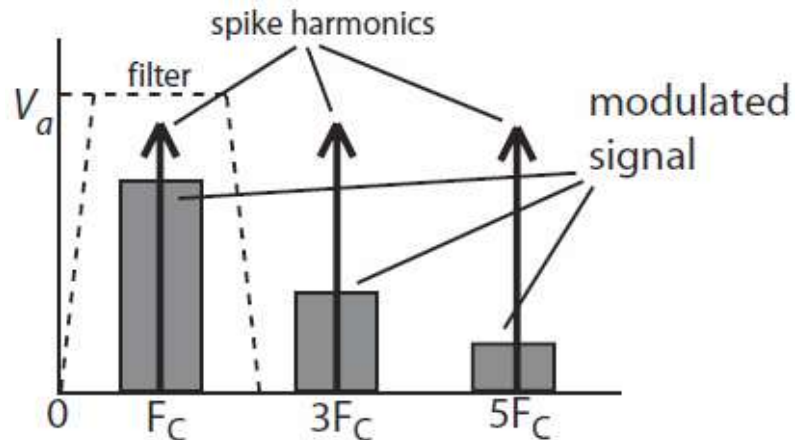
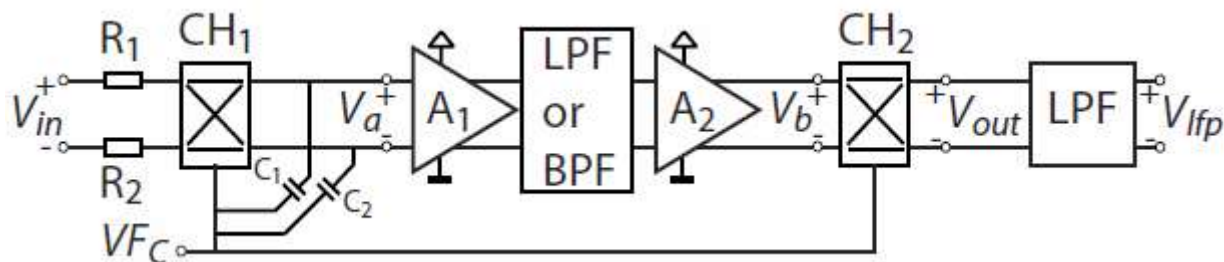


$\Delta V_{be} \sim kT/q$  read-out using nested chopper technique  
 $\Rightarrow \pm 1^\circ\text{C}$  uncalibrated accuracy

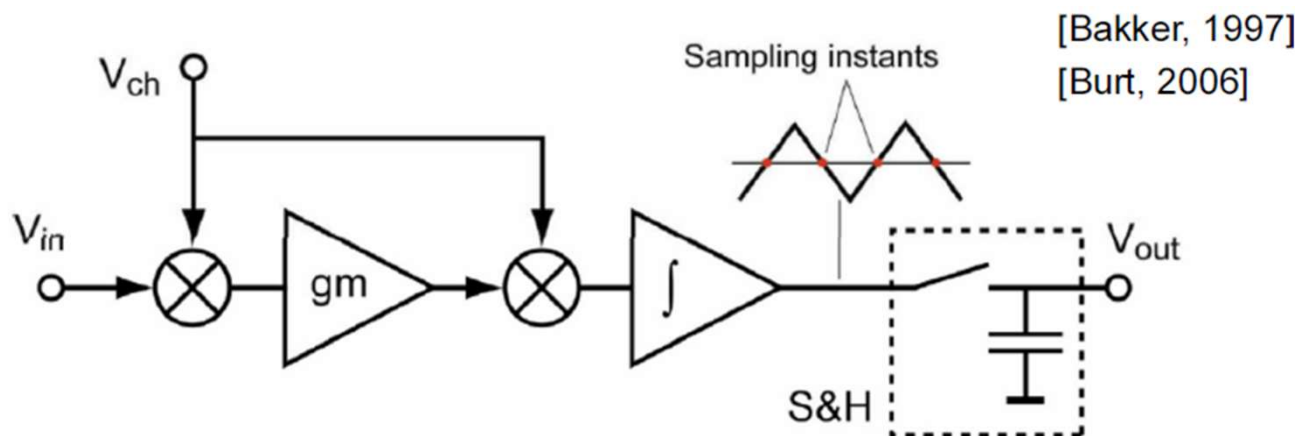
## 2.4.2. Filtriranje spajkova

### 2.4.2.1. Kontinualni filter

- Zbog simetrije se može pretpostaviti da spajkovi imaju neparne harmonike
- Filtriranjem se mogu potisnuti viši harmonici i time smanjiti naponski spajkovi

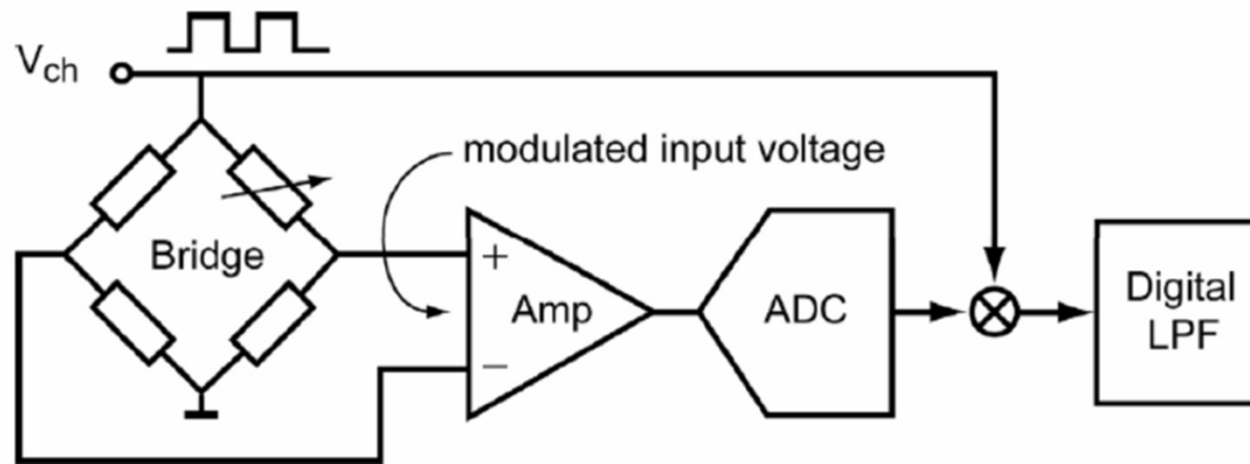


## 2.4.2.2. SC filter



- Integral pravougaonog signala daje trougaoni signal
- Ako se trougaoni signal sempluje pri prolasku signala kroz nulu, na izlazu S&H kola ripple će biti jednak nuli
- Nedostatak: SC filter unosi kašnjenje i dodatni šum

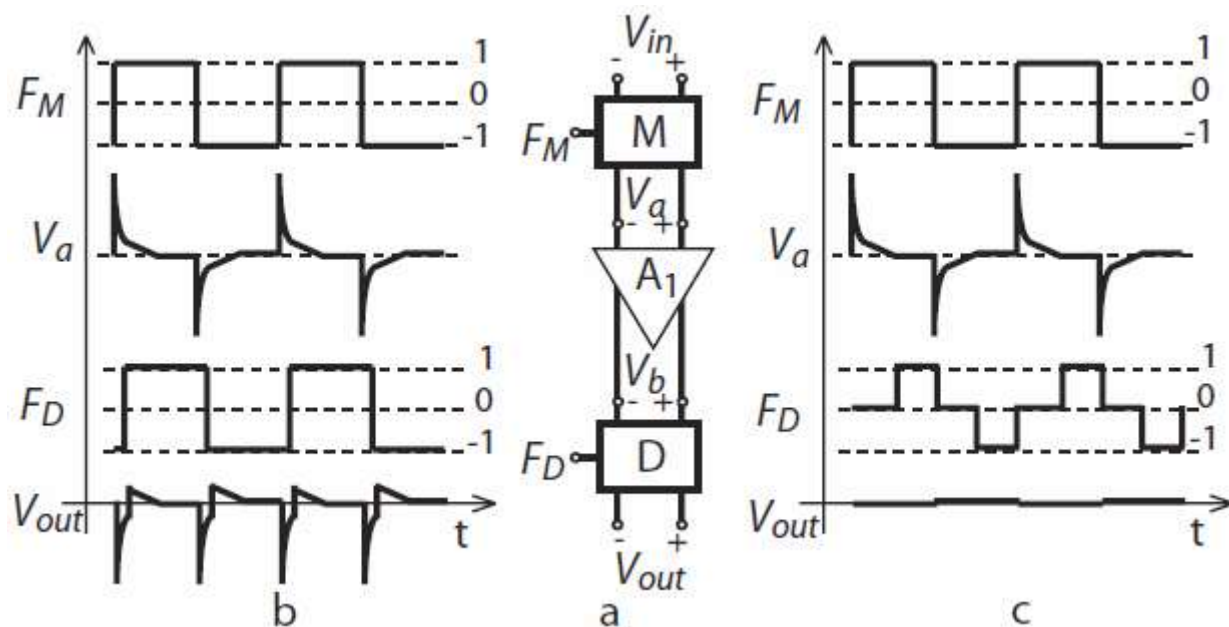
### 2.4.2.3. Digitalni filter



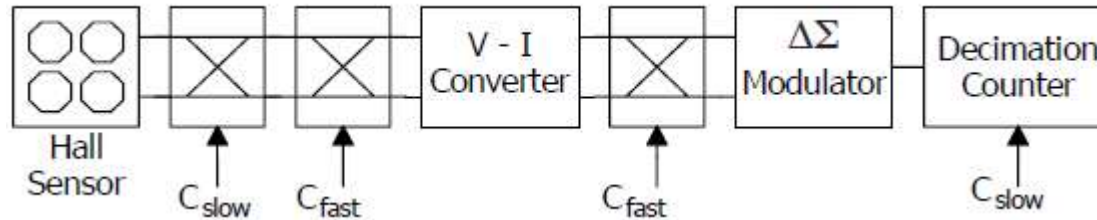
- Koristi se digitalni notch filter koji potiskuje signale na učestanosti  $f_{chop}$

### 2.4.3. Delayed modulation and guard band

- Kada su poznati vremenski oblici i trajanje spajkova, radi potiskivanja spajkova može se primeniti različit signal takta u modulatoru (M) i demodulatoru (D).
- Signal takta u demodulatoru ima prelaznu zonu, tokom trajanja spajkova, kada je jednak nuli. Na taj način se postiže da spajkovi u izlaznom naponu imaju veoma malu srednju vrednost, odnosno ekvivalentni rezidualni offset na ulazu.
- Dobra osobina ovog kola je što ne meri amplitudu, već vreme i može se lako digitalizovati
- Razdešenost između trajanja spajkova i kašnjenja signala u demodulatoru, stvaraju konačan rezidualni offset.

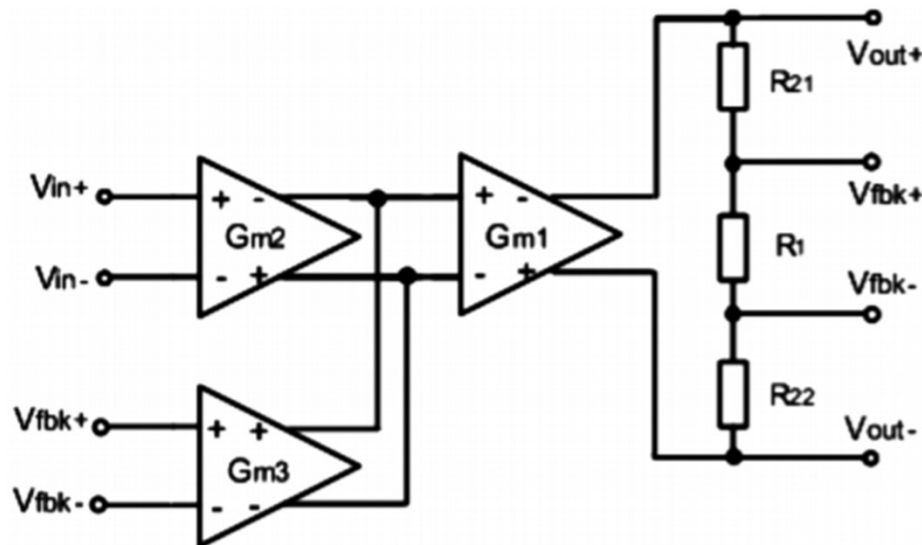


J.C. van der Meer, F.R. Riedijk, E. van Kampen, K.A.A. Makinwa, J.H. Huijsing, "A fully integrated CMOS hall sensor with a 3.65μT 3σ offset for compass applications", IEEE ISSCC, pp. 246–247, Feb. 2005.

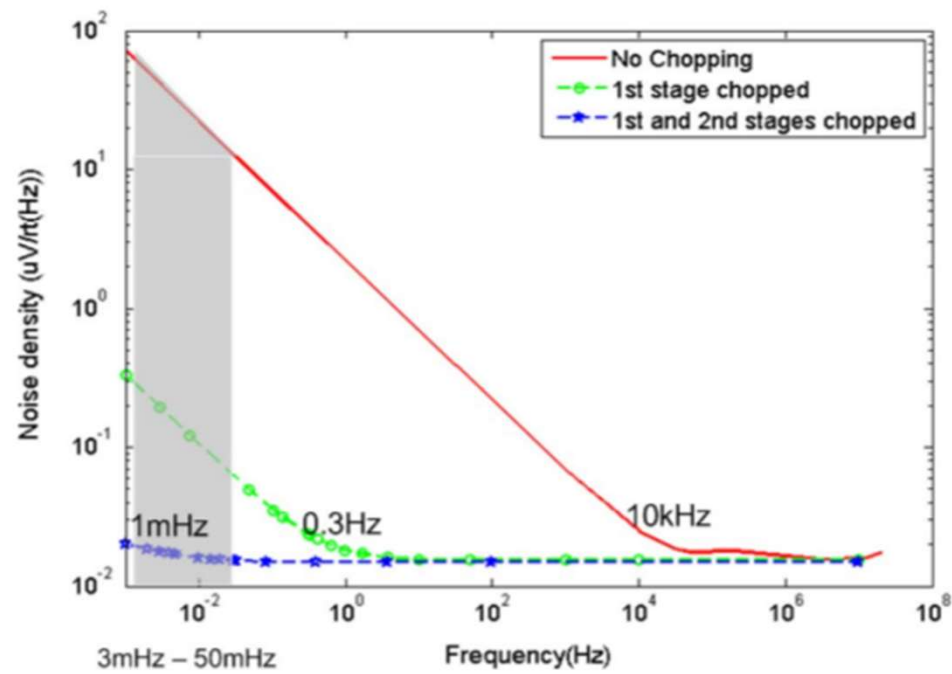
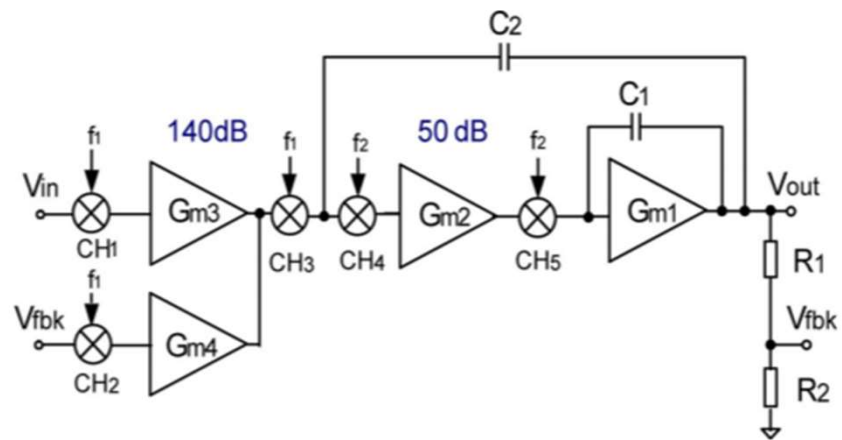


### 2.4.4. Ripple Reduction loop

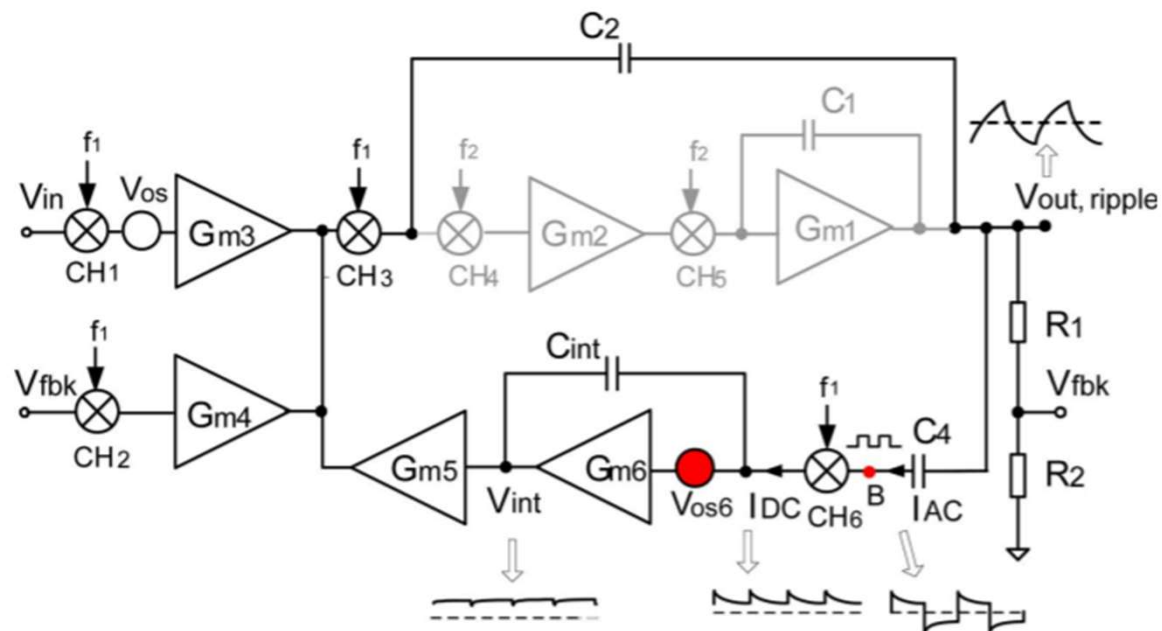
- Current-feedback instrumentation amplifier



$$\frac{V_{out}}{V_{in}} \cong \left( 1 + \frac{R_{21} + R_{22}}{R_1} \right) \frac{G_{m2}}{G_{m3}}$$



## CONTINUOUS-TIME RIPPLE REDUCTION LOOP

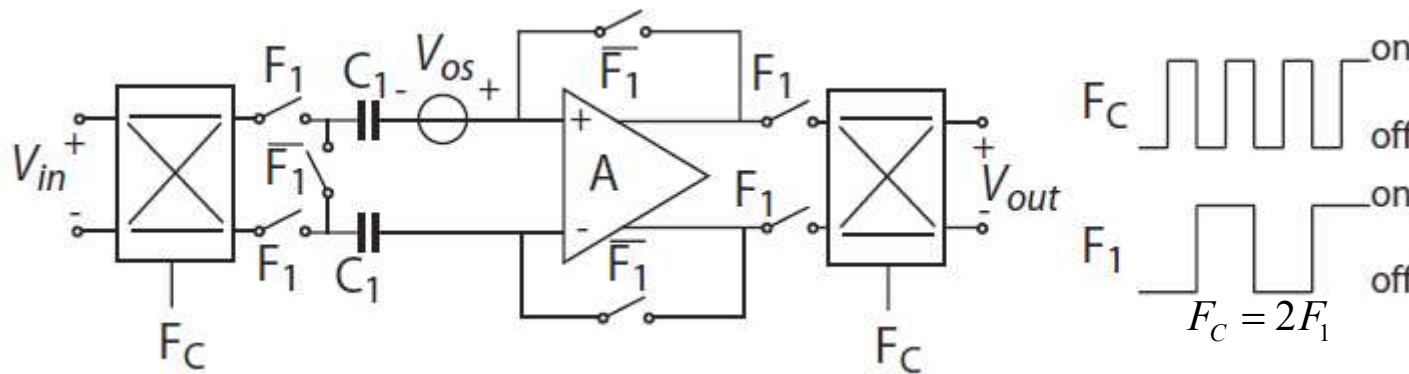


- Pomoću Millerovog kompenzacionog kondenzatora C2 se dobija približno trougaoni napon ripple-a na izlazu
- Koristi se dodatna AC povratna sprega koja detektuje izlazni ripple i vraća signal koji čini da je na ulazu CH<sub>3</sub> ulazna DC struja jednaka nuli
- Ripple se, zbog povratne sprege, može potisnuti ispod nivoa šuma na izlazu

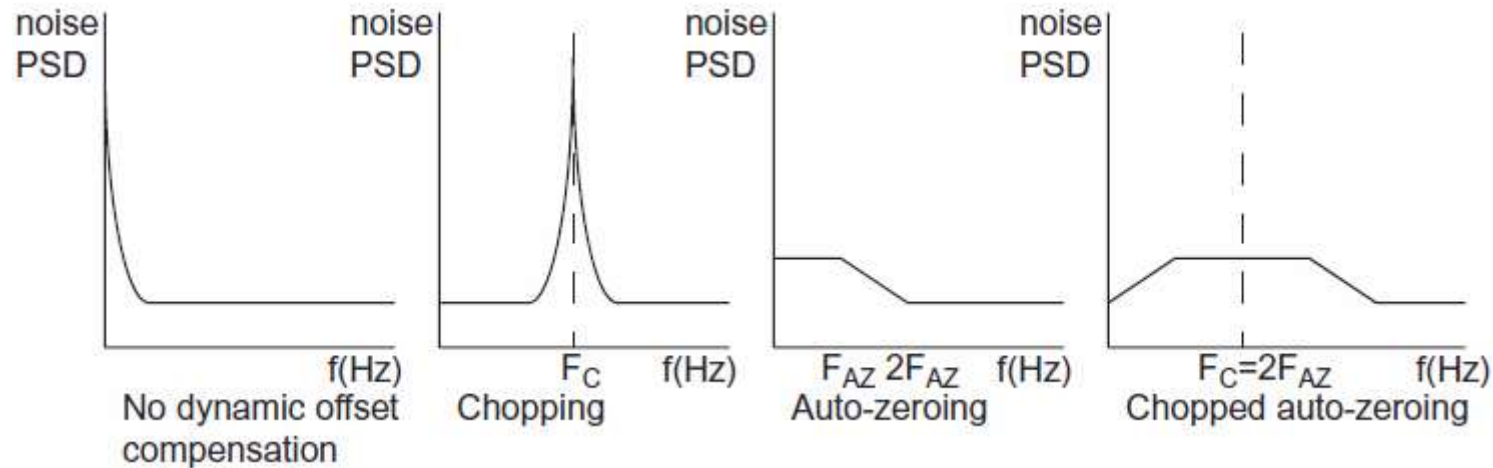


## 2.5. Čoperski auto-zero pojačavači

- Teoretski, kombinacija automatskog nuliranja u čoperskim pojačavačima treba da ima bolje performanse, jer se rezidualni ofset pojačavača sa automatskim nuliranjem može smanjiti.
- Praktično u nekim aplikacijama charge injection čopera je dominantan izvor rezidualnog ofseta, a automatsko nuliranje imaće samo mali uticaj.



- Međutim, postoji i efekat šuma, jer se preklopljeni (folded) beli šum takođe moduliše. Zajedničko kolo ima smanjen efekat folded termičkog šuma zahvaljujući čoperskom efektu.
- Kada je pojačavač sa automatskim nuliranjem, koji radi sa taktom čiji je faktor ispune 50%, čoperski modulisan dvostrukom učestanošću, šum oko DC učestanosti treba da bude optimalan.
- Smanjenje šuma na niskim frekvencijama, kao i porast šuma prema čoperskoj frekvenciji, skicirano je na sledećoj slici.



- Folded noise se može čoperski modulirati još većim učestanostima
- Tokom svake faze polaritet čopera treba da bude pozitivan i negativan u jednakom vremenskom periodu, kako bi se usrednjio doprinos šuma, koji se uzorkuje tokom svake faze automatskog nulovanja.
- Stoga će se optimalni šum na niskim frekvencijama postići kada je:

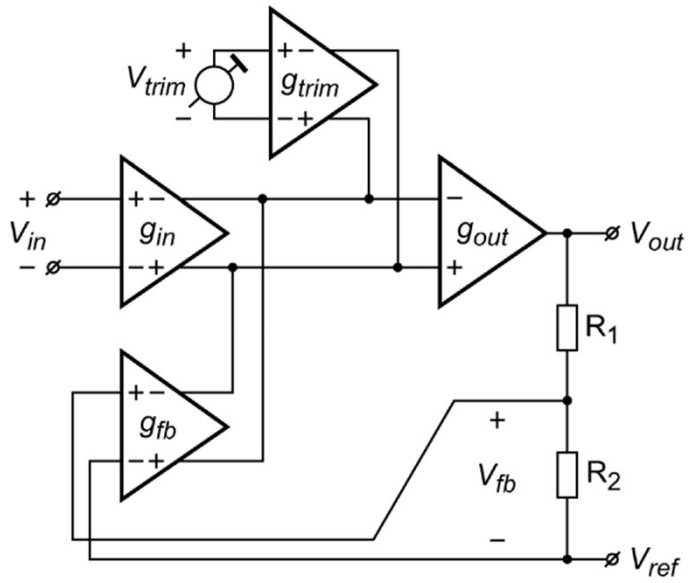
$$F_C = \frac{n}{d} F_1, n = 1, 2, 3, \dots$$

## 2.6. Pojačavači sa kompenzovanim dinamičkim ofsetom

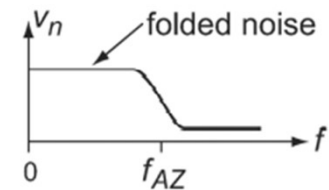
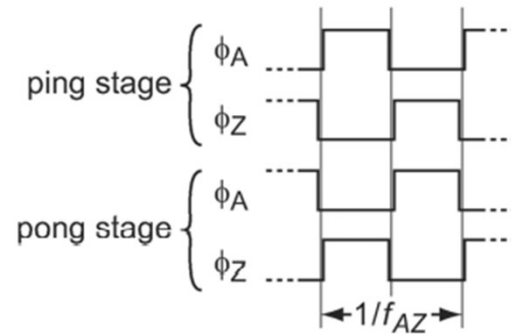
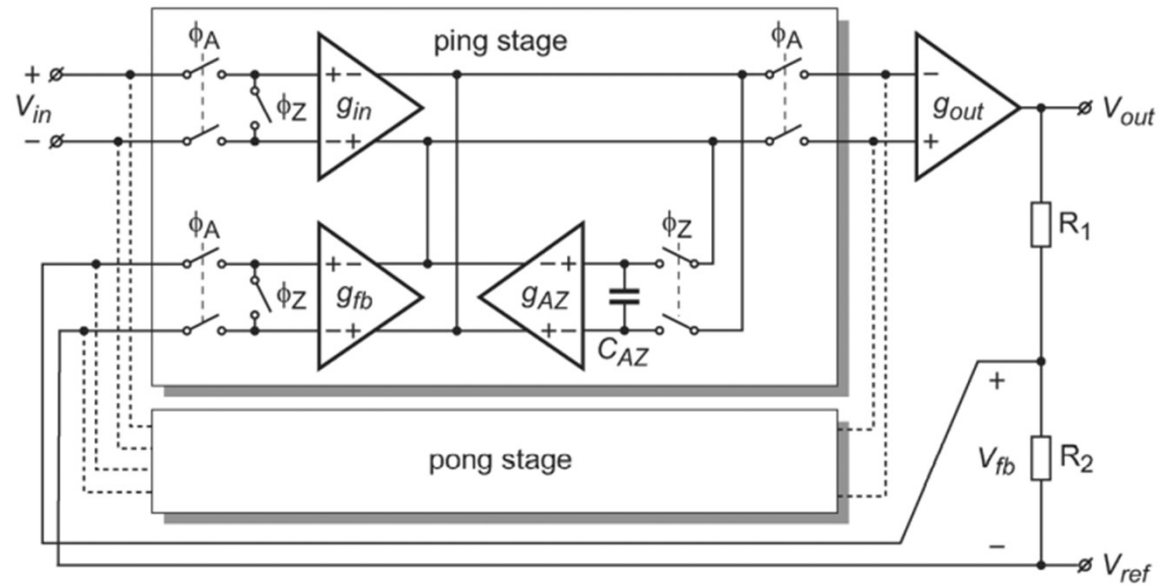
- Čoperi koriste tehnike frekventne modulacije koja zahtijeva NF filtre, pa stoga korišćenje samo čopera nije pogodno za širokopojasne aplikacije.
- Automatsko podešavanje nule je tehnika u vremenskom domenu u kojoj se ofset meri i oduzima od signala. Stoga ova tehnika sama po sebi nije pogodna za kontinualne signale
- Kombinacijom ovih tehnika u višestepenim topologijama mogu se realizovati širokopojasni pojačavači za kontinualne signale.
- Jedan od načina za stvaranje pojačavača sa kontinualnim izlazom pomoću tehnike podešavanja nule je ping-pong tehnika.
- Ping-pong pojačavač sa automatskim nuliranjem koristi dva pojačavača sa automatskim nuliranjem, koja rade paralelno jedan sa drugim.
- Dok se jedan pojačavač automatski nulira, drugi se koristi za pojačavanje signala.
- Na ovaj način se širokopojasni operacioni pojačavač dobija multipleksiranjem u vremenskom domenu dva auto-zero pojačavača.
- Jedan pojačavač je uvek u režimu sa pojačanjem signala, kako bi se obezbedio feedback.

- Current-feedback IA

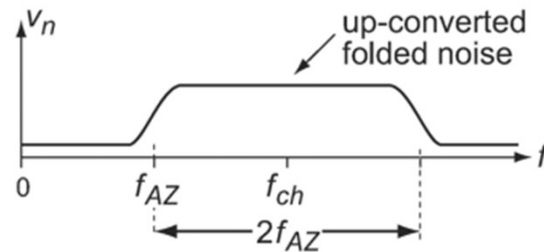
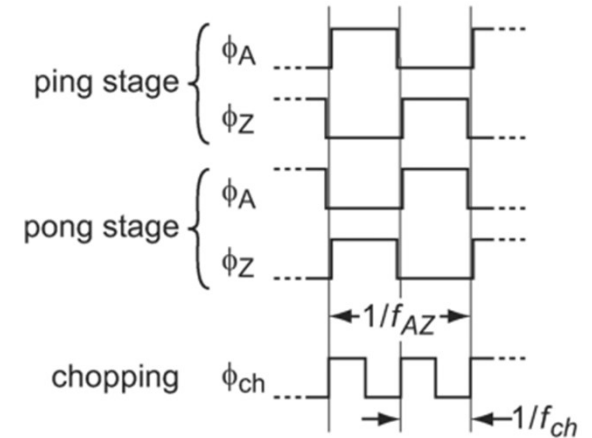
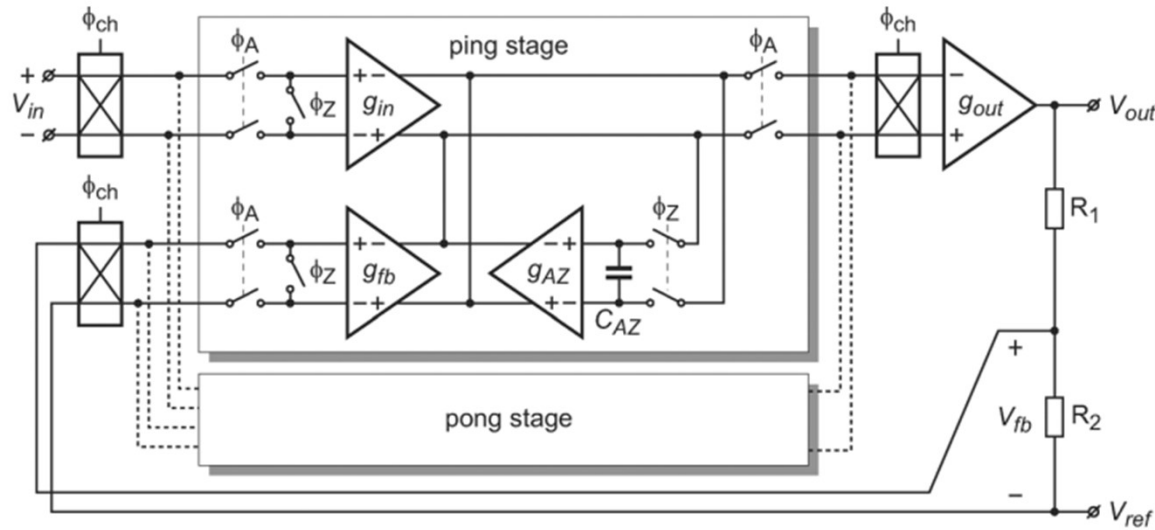
## Ping-pong auto-zeroed CFIA



$$g_{in} = g_{fb} \Rightarrow V_{out} = V_{ref} + \frac{R_1 + R_2}{R_2} V_{in}$$



## Ping-pong auto-zeroed CFIA chopped at $f_{ch}=2f_{AZ}$



M. A. P. Pertijs, W. J. Kindt , “A 140 dB-CMRR Current-Feedback Instrumentation Amplifier Employing Ping-Pong Auto-Zeroing and Chopping”

